

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.003

连续极端暴雨事件下小流域侵蚀泥沙流失规律研究

王伟^{1,2}, 李志能^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 张祎^{1,2}, 常恩浩^{1,2}, 苏远逸^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 近年来,随着极端降雨事件的频发,原位土壤伴随着侵蚀大量的迁移流失,因此,建立一个基于水力学特征侵蚀泥沙流失的经验模型具有重要的意义。为解决这一问题,在黄土高原选择坡度相近的4种植被演替类型并以裸地为对照开展野外原位冲刷试验。在连续的冲刷条件下,首次冲刷的泥沙浓度、泥沙损失量最大,荒地泥沙总损失量最高,达到14.62 kg,而苜蓿泥沙总损失量最低,仅为0.49 kg。在所选取的5个水力因子中,仅平均流速与泥沙浓度和泥沙损失量之间有显著相关性。受流速控制的砂粒的选择性运移导致了流速与侵蚀泥沙的相关性。根据水力因子和侵蚀泥沙的关系,建立了基于水动力的泥沙损失模型,所有预测值都可以与测量值吻合良好。基于水动力的泥沙损失经验模型可以作为基于物理的泥沙模型的重要参考,也可以为坡面发生严重侵蚀时的侵蚀泥沙损失预测提供思路。

关键词: 黄土高原; 极端暴雨; 侵蚀泥沙; 流失

中图分类号: TV121⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)03-0286-08

Study on the law of erosion and sediment loss in continuous extreme rainstorm events in the Loess Plateau

WANG Wei^{1,2}, LI Zhineng^{1,2}, LI Peng^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2},
CHANG Enhao^{1,2}, SU Yuanyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China)

Abstract: In recent years, with the frequent occurrence of extreme rainfall events, a large amounts of in-situ soil migration and loss have been accompanied by erosion; therefore, it is of great significance to establish an empirical model of erosion and sediment loss based on hydraulic characteristics. In order to solve this problem, four planting succession types with similar slopes are selected in the Loess Plateau with the bare land used as a control to carry out the field in situ erosion test. Under continuous scouring conditions, the first scouring sediment concentration and sediment loss are the largest, and the total loss of wasteland sediment is the highest, reaching 14.62 kg, while the total loss of the land for growing alfalfa is the lowest, only 0.49 kg. Among the five selected hydraulic factors, only the average flow velocity has a significant correlation with the sediment concentration and the amount of sediment loss. The selective migration of sand grains controlled by flow velocity leads to the correlation between flow velocity and eroded sediment. According to the relationship between hydraulic factors and eroded sediment, a sediment loss model based on hydrodynamics is established, with all predicted values in good agreement with the measured values. The hydrodynamic-based sediment loss empirical model can be used as

收稿日期: 2020-09-03; **网络出版日期:** 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1543.017.html>

基金项目: 陕西省创新人才推进计划项目科技(水土资源环境演变与调控)创新团队资助项目(2018TD-037);陕西省水土保持和移民工作中心城镇水土保持技术集成资助项目(104-441120034);陕西省水利科技项目(2017slkj-21)

第一作者: 王伟,男,博士生,研究方向为水土保持。E-mail: 360007519@qq.com

通信作者: 李鹏,男,博士,教授,博导,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: lipeng74@163.com

an important reference for the physical-based sediment model, and can also provide ideas for the prediction of erosion and sediment loss when severe erosion occurs on the slope.

Key words: the Loess Plateau; extreme rainstorm; eroded sediment; loss

黄土高原地区地形破碎,主要表现为黄土高原沟壑和黄土丘陵沟壑等流域侵蚀地貌特征,是世界上水土流失最严重的地区之一^[1]。土壤侵蚀是土壤破坏、剥落、迁移和沉积的过程^[2-3]。土壤侵蚀是导致土壤退化、生产力下降的普遍原因,因而严重制约农业发展。土壤侵蚀和泥沙搬运使致使土壤中各类养分含量发生变化,从而影响元素地球化学循环^[4]。

随着人类社会的发展和进步,对自然环境的研究日益得到重视,坡面流水动力学研究也得到了突破的进展,由最初的经验性分析进一步向动力学特征机制进行研究。径流水力学参数主要有平均流速、水深、Reynolds 数、Froude 数以及阻力系数等^[5-7]。坡面径流流速不仅是坡面径流最重要的水力学参数^[8],还是研究土壤侵蚀动力学的基础,它能够明显地影响径流携带及搬运的能力^[9]。张光辉等^[10]通过分析平均流速与土壤分离速率之间关系,得到二者之间存在密切的幂函数关系,能够较好地预测土壤的分离速率。从侵蚀产沙动力学方面分析侵蚀机理是当前研究的热点及难点,目前描述侵蚀过程常用的是径流剪切力、水流功率和单位水流功率,同时这些参数也被用来衡量侵蚀发生的临界水动力条件^[11]。

近几年来,随着极端暴雨事件的增多,极端降雨俨然成为了近年来的研究热点问题。相关的研究发现,极端降雨对流域产沙的形成发挥了重要的作用。孙维婷^[12]通过研究得出,极端暴雨量直接影响径流量和输沙量。徐天乐等^[13]研究表明极端降雨事件对次生生态系统土壤侵蚀的影响非常剧烈,同时容易诱发地质灾害。卫伟等^[14]研究发现极端降水加剧黄土丘陵区土壤侵蚀。这些研究表明极端降雨改变了坡面产流特征,易引发地表径流,加剧土壤侵蚀,引起输沙量的变化。关于极端降雨事件的研究已取得了一系列的研究成果,但是在连续极端降雨事件下,对侵蚀产沙的预测还相对薄弱。因此,研究连续降雨事件对侵蚀产沙的影响,对揭示水动力过程下的泥沙迁移机理有着重要的意义,同时为坡面发生严重侵蚀时的泥沙损失预测提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省绥德县城北 3 km 的辛店沟小流域。流域坐标为东经 110°18'01", 北纬 37°30'56"。

流域总面积 1.44 km²,属于典型黄土丘陵沟壑区,土壤质地均为黄绵土,年平均气温为 10.2℃,多年平均降雨量为 513.1 mm,主要集中在 7~9 月,且多以暴雨形式出现,汛期降水量可达到全年降水量的 73.1%。辛店沟小流域于 2010 年被中国水利部确定为全国水蚀试验小流域。目前,辛店沟小流域治理度达到 80% 以上,林草覆盖率达到 75% 以上,土壤侵蚀量减少 80% 以上^[15]。流域位置见图 1。

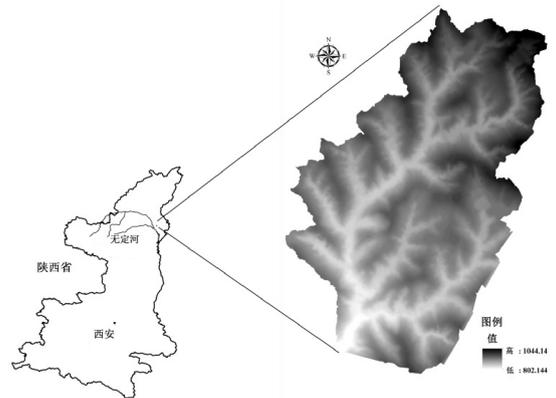


图 1 研究区概况

Fig. 1 Position of the basin

1.2 样地选择和实验区布局

本研究样地选择以植被自然恢复的坡面为调查对象。根据该流域植被恢复状况,对照植被演替的规律选择 4 种植被类型,分别为多年生白羊草群落 (*Bothriochloa ischaemum*), 多年生苜蓿群落 (*Medicago sativa*), 多年生铁杆蒿群落 (*Artemisia sacrorum*), 多年生枣树群落 (*Ziziphus jujuba*), 并选择裸地作为试验的对照处理。此外,由于各个样地所处的环境不一致,因此,在选择样地时,对坡度、坡向及海拔、植被长势稳定的植被群落选择利用“时空互代”的方法进行选择(见表 1)。此法能够在保证不扰动原有地貌的前提下,尽可能减少海拔及坡度等因素的差异以达到研究目的,因此可认为海拔、坡度等地形因素对结果的影响可以忽略。各试验样地土壤颗粒组成、植被特征及地形信息见表 1。

本研究采用野外原位径流小区连续冲刷法研究不同植被类型在连续高冲刷流量下对侵蚀泥沙迁移的影响。试验小区规格根据实际情况,尺寸确定为 4 m × 0.5 m。在每个样地内采用 10 块宽铁板(1 m × 0.45 m)的沿地面插入地下 0.25 m,围成 1 个 2 m² 的冲刷区

域。为保证水流能均匀进入土壤坡面,在上坡段1.0 m长度作为水流过渡段。小区尺寸布设见图2。为防止边界渗水,在铁板插入地下过程中,在尽可能避免过多土壤被扰动的前提下利用铁锤进行夯实,且尽量防止边界有植被根系阻挡,以减少对实验结果

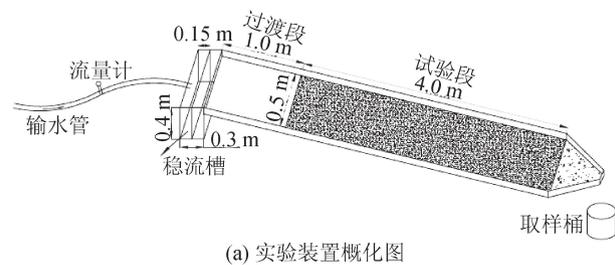
的影响。在小区正上方设置稳流槽,底部出水口安装集流槽用来收集流泥沙样。小区上方利用200 L储水桶进行供水,通过潜水泵连接水管抽取储水桶中水至稳流槽,水管出口安装流量计用精确流量大小。

表1 样地基本情况

Tab.1 Basic information on each experimental site

样地类型	恢复时间/a	砂粒占比/%	粉粒占比/%	黏粒占比/%	坡度/(°)	坡向	海拔/m	植被覆盖度/%
HD	2	76.450	23.340	0.210	8	半阳坡	980	0
BYC	15	87.191	12.741	0.068	8	阳坡	965	85
MX	25	90.261	9.710	0.021	9	阳坡	960	60
TGH	8	91.441	8.531	0.028	7	阳坡	970	82
ZS	40	88.51	11.441	0.049	9	阳坡	960	40

注:HD—荒地,无植被;BYC—草地,植被种类为白羊草;MX—草地,植被种类为紫苜蓿;TGH—草地,植被种类为铁杆蒿;ZS—林地,植被种类为枣树。



(a) 实验装置概化图



(b) 实验现场布设图

图2 实验示意图

Fig.2 Layout of experimental plot

1.3 冲刷试验

该研究实验小区宽度条件下的冲刷流量根据该区标准径流小区(20 m×5 m)在极端暴雨强度条件下产生的最大单宽径流量来确定,即16 L/min。在试验小区布设完成后,利用剪刀等工具将小区内地上植被部分清理干净,然后采用3D激光扫描仪对试验前径流小区地形情况进行扫描记录。试验前多次率定流量,当与设计流量相对误差在3%以内后开始进行试验,单坡面径流由集流槽流出后开始计时,每1 min取径流泥沙样1次,用于测定泥沙浓度SC,采集的径流泥沙样在60℃下烘干称重,此时称重的质量为泥沙的质量TSL,并收集于自封袋中保存,以便于后续的分析。每2 min测量一次流速,径

流宽,径流深,冲刷时间为30 min。采用染色剂示踪法KMnO₄对坡长1 m、2 m、3 m和4 m处依次进行测定径流流速,记录水流通过坡面时间,并分别直至冲刷结束。整个流速,径流宽,径流深,测定过程由单人操作完成,以确保系统误差一致。试验完成后,再次采用3D激光扫描仪对试验后径流小区地形情况进行扫描记录。每种植被类型进行连续冲刷,每次冲刷试验时间为30 min,且连续冲刷时间间隔不低于24 h,共冲刷3次。

1.4 土壤采集方法

冲刷试验前,在选定的径流小区内,按照坡长1 m、2 m、3 m和4 m分别采集表层土壤样品,装入自封袋中,用于试验前土壤颗粒组成。冲刷试验结束后,按照冲刷试验前土壤采集的位置再次进行土壤采集,用于试验后土壤颗粒组成测定。整个冲刷试验收集的泥沙样品和土壤样品,使用英国马尔文公司的(Mastersizer2000,英国)激光粒度仪测定对土壤颗粒组成进行测量,在测定第一次样品时直接测定有效泥沙颗粒组成,不做任何分散处理。第二次测定时,应在剩余样品中先加入适量的双氧水,再加入(NaPO₃)₆,其目的是去除有机质和进行化学分散,然后通过激光粒度仪自带的超声波分散后再次进行测定,最终获得原始土壤的泥沙颗粒组成。按照美国制分级,可将测定后泥沙颗粒划分为:黏粒(<0.002 mm),细粉粒(0.002~0.02 mm),粗粉粒(0.02~0.05 mm),细砂粒(0.5~0.25 mm)和粗砂粒(>0.25 mm)。

1.5 指标计算

泥沙分散前后的各种指标计算见下^[16]。

1) 流速:

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

2) 径流深度:

$$D = \frac{q}{v} \quad (2)$$

3) 剪切力:

$$\tau = \rho g D S \quad (3)$$

4) 径流功率:

$$\omega = \rho g S q \quad (4)$$

5) 单位水流功率:

$$\Omega = V S \quad (5)$$

式中: V 为径流速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); L 为径流流过的距离 (m); t 为通过 L 距离径流所消耗的时间 (s); D 为平均径流深度 (m); q 为单位宽度径流量 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); τ 为剪切力 (Pa); ρ 为水密度, 在 25°C 下为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力参数, 值为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; S 为坡度 ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$); ω 为径流功率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); Ω 为单位水流功率 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

1.6 侵蚀泥沙模型

径流输沙模型主要通过水力参数、泥沙颗粒组成和坡度进行估算, 由 Govers^[17] 提出的径流输沙能力模型在土壤侵蚀预报模型中应用最为广泛, 例如 EUROSEM 模型等。该模型以单位径流功率作为重要的输入参数, 具体模型公式为:

$$Q_s = \rho_s Q a [\Omega - \Omega_{cr}]^b \quad (6)$$

$$a = \left[\frac{D_{50} + 5}{0.32} \right]^{-0.6} \quad (7)$$

$$b = \left[\frac{D_{50} + 5}{300} \right]^{0.25} \quad (8)$$

式中: Q_s 为产沙率 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ_s 为泥沙密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Q 为产流率 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Ω 为单位径流功率 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Ω_{cr} 为临界径流功率 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其值通常为 $0.004 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; a 和 b 为回归系数; D_{50} 为泥沙中值粒径 (μm).

EUROSEM 模型建立在流速和坡度对径流输沙能力影响相同的假设上。然而在径流侵蚀过程中由于流速和坡度对土壤侵蚀的影响存在差异。因此, 用流速和坡度等参数代替单位径流功率对输沙进行预测, 可以提高模型精度。本研究将坡度定为固定值来对 Govers^[17] 提出的模型进行修改, 沉积物损失模型修改为:

$$E_s = 1000 \times a \times \rho_s \times q_s \times t \times V_s^b \times S \quad (9)$$

式中: E_s 为产沙量 (kg); q_s 为径流率 ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$); V_s 为流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

1.7 数据处理

本研究使用 SPSS 18.0 软件来分析所涉及的因素方差分析 (ANOVA) 和 Pearson 相关性分析

(Pearson Correlation Analysis), 采用的显著性水平为 $P < 0.05$; 主成分分析和部分相关性分析则采用 SAS JMP 11.0 软件分析, 采用 SAS JMP 11.0 绘制部分图形; 采用 Origin 10.0 软件绘制文中大部分图形。

2 分析与结果

2.1 泥沙损失特征

见图 3, 在黄土高原 $16 \text{ L}/\text{min}$ 的高冲刷流量下, 荒地连续冲刷之后泥沙浓度均显著高于其它退耕植被, 且泥沙流失量也显著高于其它退耕植被, 进而说明根系对侵蚀的抵抗能力起到至关重要的作用。此外, 在连续的冲刷条件下, 首次冲刷的泥沙浓度、泥沙流失量均显著高于其余两次冲刷。

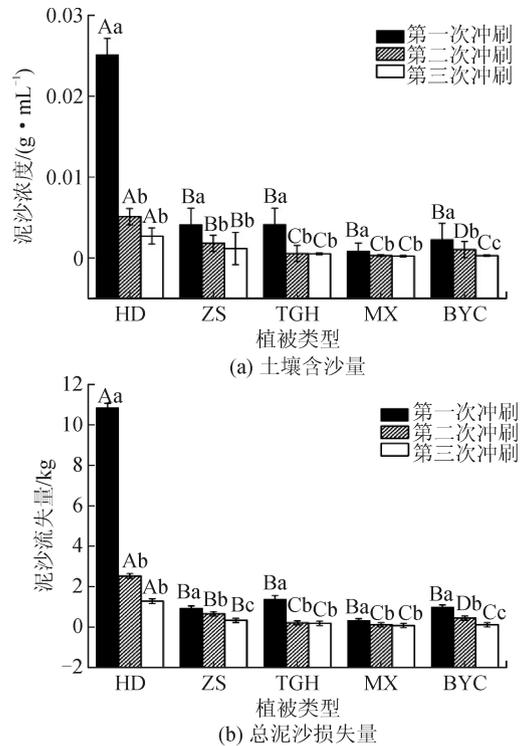


图 3 坡面土壤含沙量、总泥沙损失量

Fig. 3 Slope soil sediment content and total sediment loss

注: 大写字母表示同一场次不同类型之间的差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母表示同一类型不同场次之间的差异显著 ($P < 0.05$)

整体来看 (见图 4), 在连续三次高流量冲刷后, 荒地泥沙总损失量最高, 达到 14.62 kg , 而苜蓿泥沙总损失量最低, 仅为 0.49 kg 。荒地退耕为苜蓿之后, 侵蚀泥沙量可以降低近 30 倍, 退耕为枣树、铁杆蒿和白羊草之后侵蚀泥沙量也均降低 8.25、9.55 和 7.65 倍。

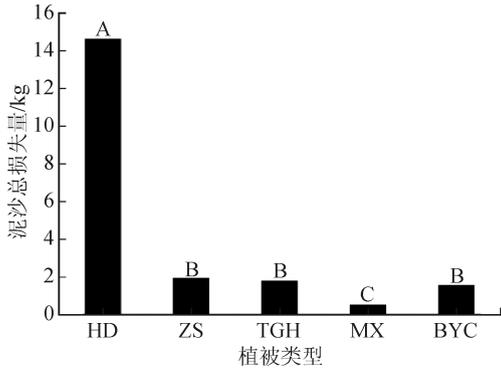


图4 泥沙总损失量
Fig. 4 Total loss of sediment

表2 泥沙损失、水流特性(平均流速、径流深度)与水力参数(剪应力、水流功率和单位水流功率)的相关关系
Tab.2 Correlation between sediment loss, water flow characteristics (average velocity, runoff depth) and hydraulic parameters (shear stress, water flow power and unit water flow power)

因子	不同因子下的相关度						
	流速 V	径流深度 D	剪切力 τ	径流功率 ω	单位水流功率 Ω	泥沙浓度 SC	泥沙总量 TSL
V	1	-0.796**	-0.795**	0.670**	0.627*	0.401**	0.439**
D	-0.796**	1	1.000**	-0.154	-0.527*	-0.137	-0.156
τ	-0.795**	1.000**	1	-0.152	-0.547*	-0.136	-0.155
ω	0.670**	-0.154	-0.152	1	0.396	0.382	0.437
Ω	0.627*	-0.547*	-0.547*	0.396	1	0.172	0.199
SC	0.401**	-0.137	-0.136	0.382	0.172	1	0.995**
TSL	0.439**	-0.156	-0.155	0.437	0.199	0.995**	1

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关

2.3 流速与侵蚀泥沙的关系

采用主成分分析研究了流速对侵蚀泥沙的影响机理。通过PCA分析,从7个参数中提取了2个主成分序列(PCs),因为两个PCs解释了原变量可变性的79.1%,见表3。

表3 侵蚀泥沙的旋转主成分(PCA)格局及其相关因素
Tab.3 Rotating principal component (PCA) pattern for eroded sediment and its related factors

因子	PC-1	PC-2
	土壤易蚀性因子(52.8%)	水力因子(21.0%)
SC	0.9823	0.1868
TSL	0.9708	0.2229
中值粒径 δD_{50}	0.1291	0.0264
流速(1 m)	0.2286	0.3898
流速(2 m)	0.4172	0.9628
流速(3 m)	0.0437	0.9078
流速(4 m)	0.1201	0.8566

2.2 泥沙损失与水力因子之间的关系

分析了两个主要的水动力特征(平均流速和径流深度)和三个水力参数(剪切力、水流功率和单位水流功率)对泥沙损失的影响。见表2,平均流速与泥沙浓度和泥沙损失量显著相关($P < 0.05$),但泥沙浓度和总泥沙损失与其他水力学参数未表现出显著的相关性。Sajjadi 和 Mahmoodabadi^[18]提出水流功率、剪切力和单位水流功率均与泥沙浓度特别是流速有显著关系,Liu等^[19]也得出径流功率与泥沙损失量呈现出显著相关的关系。但在我们的研究中,径流深度、剪切力和单位径流功率与含沙量、总输沙量无显著相关性,仅平均流速与泥沙浓度和泥沙损失量之间有显著相关性。

的因素,因此将PC-1定义为土壤易蚀性因子,该因子解释了原变量可变性的52.8%。第二PC2(PC-2)随着流速的增加而增大,因此将PC-2定义为水力因子,该因子解释了原变量可变性的21.0%。PC-1占SC和TSL的0.9823和0.9708,而PC-2占SC和TSL的0.1868和0.2229,因此可以得到决定土壤侵蚀泥沙流失的土壤易蚀性因子比决定土壤侵蚀泥沙流失的水力因子更为重要。在PC上,SC和TSL也与流速有着密切的关系,尤其是在出口处2 m处的流速。

通过Pearson相关分析对侵蚀泥沙颗粒分布(粉粒、砂粒、黏粒)与流速(1 m、2 m、3 m、4 m)进行分析,进一步研究流速对泥沙颗粒的作用从而解释流速对侵蚀泥沙的影响机理(见表4)。特别是沉积泥沙中的粉粒和黏粒含量与出水口2 m处流速呈显著正相关关系($P < 0.05$),砂粒含量与流速呈显著负相关关系($P < 0.05$)。因此,对侵蚀泥沙与土壤颗粒分布进行拟合,见表5。

第一PC1(PC-1)的值代表泥沙流失和其相关

表4 土壤颗粒分布与流速相关性分析
Tab.4 Correlation analysis of soil particle distribution and velocity

因子	不同因子下的相关度						
	粉粒	砂粒	黏粒	流速(1 m)	流速(2 m)	流速(3 m)	流速(4 m)
粉粒	1	-1	0.980**	0.470	0.558*	0.275	0.281
砂粒	-1	1	-0.981**	-0.468	-0.559*	-0.276	-0.283
黏粒	0.980**	-0.981**	1	0.408	0.591*	0.320	0.349
流速(1 m)	0.470	-0.468	0.408	1	0.601*	0.359	0.379
流速(2 m)	0.558*	-0.559*	0.591*	0.601*	1	0.769**	0.828**
流速(3 m)	0.275	-0.276	0.320	0.359	0.769**	1	0.940**
流速(4 m)	0.281	-0.283	0.349	0.379	0.828**	0.940**	1

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关

表5 侵蚀泥沙与土壤颗粒拟合关系
Tab.5 Fitting relationship between erosion and sediment and soil particles

类型	粉粒+黏粒	砂粒
SC	$y = 0.0001e^{0.2008x}$ $R^2 = 0.4195; p < 0.01$	$y = 6 \times 10^{30} x_0^{-17.27}$ $R^2 = 0.4268; p < 0.01$
TSL	$y_0 = 0.0436e^{0.2242x}$ $R^2 = 0.5193; p < 0.01$	$y_0 = 2 \times 10^{37} x_0^{-19.23}$ $R^2 = 0.5255; p < 0.01$

表5中, x 为粉粒+黏粒含量, x_0 为砂粒含量, y 为泥沙浓度, y_0 为泥沙总量。

在我们的研究中发现沉积泥沙中的黏粒和粉粒和泥沙浓度以及泥沙损失量呈指数函数的分布关系,即沉积泥沙中的黏粒和粉粒含量越高侵蚀泥沙浓度则越高,沉积泥沙中的砂粒和泥沙浓度以及泥沙损失量呈幂函数的分布关系,即沉积泥沙中的砂粒含量越高泥沙浓度以及泥沙损失量也随之减少。综合可以得出,受流速控制的砂粒的选择性运移导致了流速与侵蚀泥沙的相关性。

2.4 泥沙流失预测

在高冲刷流量下,WEPP模型无法完全预测坡面上发生复杂严重侵蚀时的沉积物损失,尤其是在中国的黄土高原地区发生的重力侵蚀和细沟侵蚀。我们通过参考WEPP过程模型中对沉积物损失的估算并结合在严重侵蚀发生时的水力机制对模型进行了改进,即式(10)。即使黄土高原发生严重侵蚀,也可以通过基于水力沉积物的经验模型计算出沉积物的损失。为了更好地提高模型的精度,土壤的体积密度和单位校正系数(1 000)被纳入侵蚀模型。通过非线性回归计算了不同黄土高原植被类型下土壤的回归参数 a 和 b (见表6)。通过两场冲刷计算出模型的参数 a 和 b ,将第三场冲刷实验的产沙量

作为验证。通过将径流速率,流速和坡度值输入模型来预测泥沙损失。所有预测值都可以与测量值吻合良好(见图5)。

表6 HD,TGH,BYC,MX,ZS土壤泥沙损失预测模型
Tab.6 HD, TGH, BYC, MX, and ZS soil sediment loss prediction models

植被类型	模型参数	
	a	b
HD	3.16E-09	-0.658 101 4
TGH	1.37E-09	-1.045 286
BYC	4.22E-09	-0.194 518 9
MX	5.07E-09	0.035 351 41
ZS	2.83E-05	6.057 821

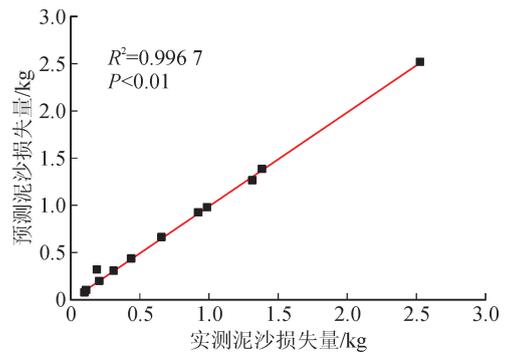


图5 测量泥沙损失和预测泥沙损失图
Fig.5 Measure and predict sediment loss map

3 讨论

植被建设是黄土高原水土流失防治的重要措施。具体来说,它在控制土壤侵蚀和减少黄河沿岸的泥沙中起着重要作用。改善植被是水土流失治理的根本措施,但不同植被类型减少土壤侵蚀的作用和能力不同。本研究发现,苜蓿在连续极端降雨事

件下,泥沙输移量处于最低的水平,这是由于在黄土区,苜蓿往往适应性较强,一般能较为迅速的郁闭覆盖地面,而且较为贴地面生长,其作用优于长期不能郁闭、林下缺乏枯枝落叶层的人工林^[20]。焦菊英等^[21]的研究表明,植被演替中前期平均土壤侵蚀强度在 $3\ 087.6\sim 4\ 408.4\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,植被演替后期在 $1\ 245.2\sim 1\ 827.8\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,与本研究植被恢复可以有效减少土壤泥沙流失量的结论相符。将荒地恢复为其它植被类型,在应对连续极端降雨事件时,均可以有效地减少侵蚀泥沙的浓度以及泥沙的总量。

悬浮、跳跃和滚动是泥沙颗粒的3种搬运方式, Moss等^[22]认为这些泥沙颗粒的粒径大小与泥沙颗粒的搬运方式有着密切关系。其中,黏粒和粉粒主要以悬浮或跳跃的方式被搬运,而砂粒则主要以滚动的方式搬运。在我们的研究中得出,泥沙含量和泥沙损失量与粘土含量之间存在正相关,与砂粒存在负相关关系。在水力因素下,径流深度、剪切力和单位径流功率与含沙量、总输沙量无显著相关性,仅平均流速与泥沙浓度和总输沙量之间有显著相关性。根据实验我们得出,流速通过增加泥沙中的粉粒和黏粒的数量来控制泥沙浓度, Rodríguez等^[23]和 Starr等^[24]通过在黄土高原研究得出黄土细颗粒主要依靠流速的跃移方式来进行运输,因此我们得出的这一结论具有可靠性。黄土中的粉粒和黏粒是土壤中最稳定的颗粒^[25],由于粉粒和黏粒质量较低,在侵蚀发生时,粉粒和黏粒会首先被搬运。

当径流水力参数达到土壤侵蚀发生的临界值时,土壤则开始发生侵蚀。也有学者研究发现,径流水力参数与径流含沙量密切相关,其中,流速与径流含沙量的相关性最为显著^[26]。因此,对于黄绵土而言,径流含沙量主要通过流速来影响其大小。结合本研究可以得出,流速与泥沙颗粒搬运及侵蚀泥沙密切相关,因此,预测土壤侵蚀量首选的径流水动力学参数为流速。本研究中,参照以往的物理模型和水流速度与侵蚀泥沙的关系,提出了基于水动力学的侵蚀泥沙流失的经验模型。该模型可以预测土壤侵蚀量,是模拟降雨或冲刷实验室建立模型和研究水力影响较为有效的方法。在本研究中也未考虑在不同冲刷流量变化的影响,此外,由于模型未涉及坡长和坡度的因子,因此在未来的研究中需探究不同坡度及坡长对侵蚀泥沙流失的影响,并将该模型应用于小流域尺度的分布式空间泥沙流失的预测,这对未来的泥沙流失预测有着至关重要的意义。

4 结 论

1) 在黄土高原极端连续降水事件下,首次冲刷的泥沙浓度、泥沙量最高,随着冲刷次数的增加,泥沙损失量逐渐的降低。

2) 沉积泥沙中的黏粒和粉粒与泥沙浓度以及泥沙损失量呈指数函数的分布关系,沉积泥沙中的砂粒与泥沙浓度以及泥沙损失量呈幂函数的分布关系。

3) 受流速控制的砂粒的选择性运移导致了流速与侵蚀泥沙的相关性,并提出了一种经验泥沙流失预测模型,模型在特定条件下,预测精度较高。

参考文献:

- [1] 茹豪,张建军,李玉婷,等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
RU Hao, ZHANG Jianjun, LI Yuting, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 176-182.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 802-809.
LI Zhanbin, ZHU Bingbing, LI Peng. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802-809.
- [3] WEI Wei, JIA Fuyan, YANG Lei, et al. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly areas, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 115-126.
- [4] QUINTON J N, GOVERS G, VAN OOST K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 311-314.
- [5] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等. 黄土坡面发育平稳的细沟流水动力学特性[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1117-1124.
WANG Longsheng, CAI Qiangguo, CAI Congfa, et al. Hydrodynamic characteristics of stable growth-rill flow on loess slopes[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1117-1124.
- [6] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
XIAO Peiqing, YAO Wenyi, SHEN Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237.
- [7] 魏霞,李占斌,沈冰,等. 陕北子洲县典型淤地坝淤积过

- 程和降雨关系的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 80-84.
- WEI Xia, LI Zhanbin, SHEN Bing, et al. Depositing process of check dams on loess plateau in Northern Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 80-84.
- [8] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究[J]. 人民黄河, 1998(8): 13-15, 46.
- ZHANG Keli. Study of flow resistance law in rill erosion on loess slope[J]. Yellow River, 1998(8): 13-15, 46.
- [9] MOSS A J. Effects of flow velocity variation on rain driven transportation and the role of rain impact in the movement of solids[J]. Australian Journal of Soil Research, 1988, 26(3): 443-450.
- [10] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan, ZHANG Keli. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 882-886.
- [11] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75-109.
- [12] 孙维婷. 延河流域极端降水时空变化及其对水沙变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- SUN Weiting. Spatial-temporal change of extreme precipitation and their effects on relation of runoff and sediment in Yanhe Basin [D]. Yanglin: Northwest A&F University, 2015.
- [13] 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等. 极端降雨对辽东山区次生林土壤侵蚀与树木倒伏的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1712-1719.
- XU Tianle, ZHU Jiaojun, YU Llizhong, et al. Impacts of extreme rainfall on soil erosion and tree-falling in secondary forest ecosystems in mountainous regions of eastern Liaoning Province, Northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(8): 1712-1719.
- [14] 王伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J]. 干旱区地理, 2007(6): 896-901.
- WEI Wei, CHEN Liding, FU Bojie, et al. Extreme rainfall events and their effects on runoff and sediment yield in the loess hilly area[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 896-901.
- [15] 党维勤. 辛店沟试验场[J]. 中国水土保持, 2016(9): 95.
- DANG Weiqin. Xindian ditch test site[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(9): 95.
- [16] MAHMOODABADI M, GHADIRI H, ROSE C, et al. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 413-421.
- [17] GOVERS G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[J]. Erosion, Transport and Deposition Processes, 1990, 189: 45-63.
- [18] SAJJADI S A, MAHMOODABADI M. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(3): 710-721.
- [19] LIU Chun, DONG Yuting, LI Zhongwu, et al. Tracing the source of sedimentary organic carbon in the Loess Plateau of China: an integrated elemental ratio, stable carbon signatures, and radioactive isotopes approach[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 167: 201-210.
- [20] 赵护兵, 刘国彬, 曹清玉. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型对水土流失的影响[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 153-155.
- ZHAO Hubin, LIU Guobin, CAO Qingyu. Influence of different vegetation on soil erosion in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2): 153-155.
- [21] 焦菊英, 王宁, 杜华栋, 等. 土壤侵蚀对植被发育演替的干扰与植物的抗侵蚀特性研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 311-318.
- JIAO Juying, WANG Ning, DU Huadong, et al. Research on effects of soil erosion on vegetation development and succession of plant resistance to erosion[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 311-318.
- [22] MOSS A J, WALKER P H, HUTKA J. Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows: an experimental study[J]. Sedimentary Geology, 1979, 22(3/4): 165-184.
- [23] RODRÍGUEZ A R, GUERRA J A, GORRIN S P, et al. Aggregates stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands[J]. Land Degradation and Development, 2002, 13(6): 515-523.
- [24] STARR G C, LAL R, MALONE R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes[J]. Land Degradation & Development, 2000, 11(1): 83-91.
- [25] ANDERSON D W, SAGGAR S, BETTANY J R, et al. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of Carbon, Nitrogen, and Sulfur[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(4): 767-772.
- [26] SAJJADI S A, MAHMOODABADI M. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(3): 710-721.